第19回 誘電体を活用する

小暮裕明

電気を伝えにくい物質を「絶縁体」と言います．電線を支える碍子は磁器製ですが，ガラス製も使われています．誘電体といえば電気的絶縁体を意味することが多いのですが，誘電体として扱われる人体は導電率が大きく，周波数によってはさまざまな部位に電磁エネルギーが集中します．誘電体線路は電磁波をガイドする線路で，身体を線路にしてしまう人体通信も現実味を帯びてきました．人間がモバイル装置を身に付けるようになり，携帯電話などでは低SAR（specific absorption rate）を目ざす設計が開発者に求められています．今回は誘電体アンテナの事例から，その具体的な手法を学びます．（筆者）

1．媒質と誘電率

空気や水は音波を伝えます．また地殻は地震波を伝えます．このように波動を伝える物質を「媒質（medium）」と言います．電磁波を伝えるのも媒質です．誘電体や空気，あるいは真空も電磁エネルギーが伝わるので媒質です．

● エーテルという媒質

弾性体にかかわる有名なフックの法則を発見した17世紀の物理学者R. Hooke[注1]は，宇宙に満たされている媒質をエーテルと名づけました．光が真空中を伝わるためにはエーテルが必要で，光は物質の熱振動がエーテルを伝わる現象と考えたのです．

19世紀末にはマクスウェル（2004年5月号，pp.131-138の連載第3回と同年9月号，pp.120-124の第5回を参照）が電磁界に関する基本方程式であるマクスウェルの方程式を導出しました．光は電磁波の一種であるとし，エーテルは電磁波を伝える媒質であると拡大解釈されたので，物理学では最近までエーテルの概念は否定されませんでした．

20世紀になると，アインシュタインは相対性理論のなかで，電磁波の伝搬にエーテルのような媒質が不要であることを説き，今日の物理学ではエーテルの概念を扱わなくなりました（p.124のコラム「エーテルの実在を調べた実験」を参照）．

● マクスウェルが考えた媒質

ニュートンの科学的な力学の方法論は，マクスウェルの時代まで2世紀もの間，多くの科学者の礎となるものでした．マクスウェルが考案した電磁現象のモデルも，ボール・ベアリングの集まりのような力学的構造で説明されています（2004年10月号，pp.142-149の連載第6回を参照）．当時の物理学はエーテルの存在が前提ですが，彼が恩師ファラデーとやりとりした手紙（1861年10月19日付け）にも，それをうかがわせる興味深い記述が見つかりました[注2]．少し長いのですが，以下に引用します．

I suppose the elasticity of the sphere to react on the electrical matter surrounding it, and press it downwards. From the determination by Kohlrausch and Weber of the numerical relation between the statical

注1：ロバート・フック（1635年～1703年）は，英国の物理学者，生物学者．ニュートンが光の粒子説を発表すると，フックは光の波動説を唱えた．
注2：マクスウェルの伝記は，Sonnet社のWebサイトからダウンロードできる．ファラデーあての手紙の該当部分はp.351にある．
http://www.sonnetsoftware.com/bio/maxbio.pdf

KeyWord
媒質，エーテル，マクスウェルの方程式，構成関係式，MKS単位系，実効誘電率，Micro-Stripes，Sonnet，八木・宇田アンテナ，誘電体アンテナ，ツイストループ・アンテナ，バラン，マイケルソンとモーレーの干渉計

and magnetic effects of electricity, I have determined the elasticity of the medium in air, and assuming that it is the same with the luminiferous ether, I have determined the velocity of propagation of transverse vibrations.
The result is 193,088 miles per second (deduced from electrical and magnetic experiments). Fizean has determined the velocity of light = 193,118 miles per second, by direct experiment.

図1に示すように，彼は周りの電気の力が下向きに押したと仮定し，球体の弾性(elasticity)を計算しました．この図を空間にある媒質と考え，光を発しているエーテル(別の手紙ではaetherとも書いている)と仮定しました．光は寒天のようなエーテルの中の振動のように伝わるという仮説ですから，これはニュートン物理学に基づく説明です．

さらにこの振動の伝わる速度を計算したところ，それは193,088マイル/s(310,678,592m/s)でした．これより10年ほど前の1849年には，フィゾーが光の干渉性と回転歯車による実験で，光の速度を193,118マイル/sと発表しています．

フィゾーの実験による速度との一致を得て，マクスウェルは彼のエーテルの仮説を確信したのではないでしょうか．そしてこのことから，光が電磁波の一種であると予言したのです．

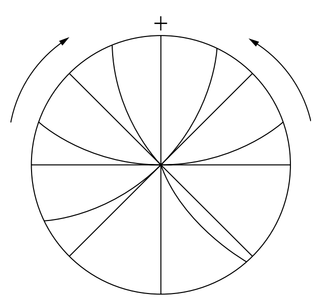


図1
マクスウェルがファラデーに宛てた手紙に描いたイラスト
空間にある球体媒質の弾性を，光を発しているエーテルと仮定して説明している．

● マクスウェルの方程式と媒質

マクスウェルの四つの方程式に加えた次の式を思い出しましょう(連載第6回を参照)．

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H} \quad \cdots\cdots (2)$$

ここでεは物質の誘電率，μは透磁率

これらは電磁界と媒質の相互作用を示す「構成関係式

Column エーテルの実在を調べた実験

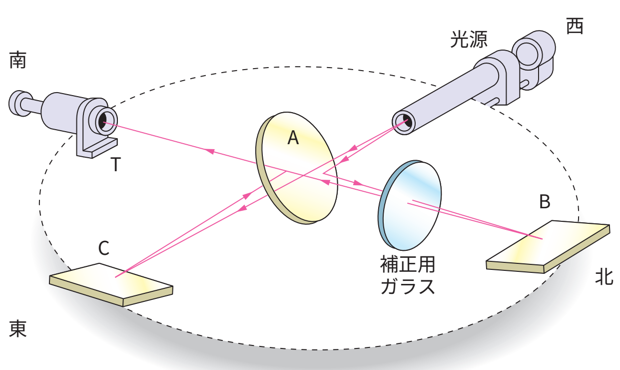
米国の物理学者マイケルソンとモーレーは，1887年に**図A-1**のような装置を使って歴史的な実験を行いました．彼らの推論は「もし光がエーテルの中を伝わっているのであれば，その速度は地球の動きによって起こるエーテルの流れに影響されるはずである」というものです．地球の動く方向に向かう光は，エーテルの流れによってわずかに速度を落とすだろうというのです．

現在は精密な実験の結果，真空中の光の速度は299,792,458m/sと定義されています．地球の速度は30km/sですから，エーテルの流れに逆らって伝わる光速は299,763km/s，流れに沿って伝わる光速は299,823km/sとなるはずです．

図A-1は，「マイケルソンとモーレーの干渉計」と呼ばれています．光源から出た光は鏡A(ビーム・スプリッタ)でBとCの2方向に分けられます．鏡の表面は薄く銀メッキされているので，通り抜けた光は鏡Cへ達し，残りは反射されて鏡Bに達します．これらで反射された光は，鏡Aを通って観測用望遠鏡Tへ向かいます．光線A→C→Tは鏡Aを3回通るので，AB間に同じ厚さのガラスを置いて，2光線の条件を同じに補正しています．

図A-1で鏡Cを東西の方向に向けると，地球の自転によってエーテルは東から西へ流れ，鏡Cで反射する光と鏡Bで反射する光の到達時間は異なります．そこで装置を90°回転すれば到達時間は前と異なり，回転前の干渉縞から移動するはずですが，装置をどの方向へ向けても光の遅れはみられませんでした(1)．

その後も多くの人々によって精密な測定器で検証されましたが，やはり「光はどの方向へ進もうと，その速度に違いがない」ことがわかり，エーテルの存在は否定されました．アインシュタインはマイケルソンとモーレーの実験とはまったく独立に，「光速度一定」の前提を立てたのだそうです(2)．



図A-1 マイケルソンとモーレーの実験装置(1887年)

(constituent relation)」と呼ばれています．

宇宙は電磁波の反射，屈折，回折，散乱や吸収などの現象が起きない空間と定義され，自由空間（free space）とも言われます．しかし，現代ではエーテルの概念は用いられませんから，「宇宙空間は一様で損失のない誘電媒質である」とする自由空間の定義には，すっきりしないものが残ります．

真空とは「物質がまったく存在しない空間」という意味です．エーテルの否定からすると，その媒質もない空間と考えられます．しかし一方では，媒質の定義そのものに「誘電体物質（誘電率ε）を含んだものや，真空（真空誘電率ε_0）など[3]」という記述がありますから，これには一本取られたという感じです．

マクスウェルの方程式から，電磁波の伝播速度すなわち真空中の光の速度cは，次の式で与えられます．

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad \cdots\cdots (3)$$

ここでμ_0：真空の透磁率$4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

ε_0：真空の誘電率8.854×10^{-12} (F/m)

電卓で式(3)の値を計算すると，確かに光の速度（左掲のコラム「エーテルの実在を調べた実験」を参照）になっています．μ_0は**図2(a)**，**図2(b)**に示すような二つの線状電流の間に働く力の計算から，次の式によって定められています．

$$\frac{\mu_0}{2\pi} = 2 \times 10^{-7} \quad \cdots\cdots (4)$$

現在のMKS単位系[注3]では，式(4)から理論的にμ_0を$4\pi \times 10^{-7}$(H/m)というシンプルな値としています．一方，ε_0は**図3**のようなコンデンサの静電容量を正確に測定することで得られます．しかし実際には，8.854×10^{-12}(F/m)という値は真空中の光の速度に合うように逆算して定めているので，式(3)の値が光速になるのはあたりまえなのです．

● 実効誘電率

マクスウェルの方程式（連載第5回を参照）のうち，次の二つの式を使います．

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \quad \text{（ファラデーの法則）} \quad \cdots\cdots (5)$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \quad \cdots\cdots (6)$$

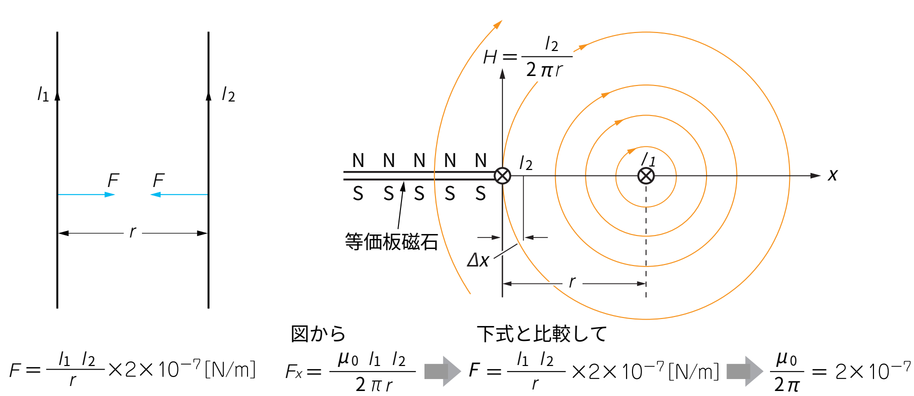
（アンペアの法則とマクスウェルの変位電流項）

式(5)，(6)に式(1)，(2)と次の式を代入します．

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} \quad \cdots\cdots (7)$$

ここでJ：導電電流，σ：導電率

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\mu \boldsymbol{H}) \quad \cdots\cdots (8)$$



(a) 二つの線状電流と力　　(b) 断面図

図2　二つの線状電流の間に働く力の計算

(b)は(a)の断面を示している．電流Iを等価板磁石に置き換えている．SからNに通る磁力線数をϕとして，I_1がΔx右に動いたとすれば，等価板磁石を通る磁力線の増加は$\Delta\phi = (I_2/2\pi)\,\Delta x$となる．$I_1$が作る等価板磁石の強さは$I_1$に比例するので，$\mu_0 I_1$として，$F_x = \mu_0 I_1 (\Delta\phi/\Delta x) = \mu_0 I_1 I_2 / 2\pi r$となる．

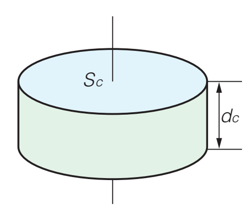


図3　コンデンサのモデル

S_cは電極の面積，d_cは電極の間隔．

注3：MKS単位系とは，メートル(m)，キログラム(kg)，秒(s)を使う単位系．μ_0を真空の透磁率と名づけ，$4\pi \times 10^{-7}$(H/m)とし，式(3)から得たε_0を真空の誘電率とする．国際標準規格「SI単位系」では，電流（アンペア）を加えた「MKSA単位系」を採用している．

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \sigma \boldsymbol{E} + \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \boldsymbol{E}) \quad \cdots\cdots (9)$$

式(9)でεは時間tに関して定数だとすれば，

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \sigma \boldsymbol{E} + \varepsilon \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \quad \cdots\cdots (10)$$

ここで$\partial/\partial t$を$j\omega$で表現して，

$$\begin{aligned} \nabla \times \boldsymbol{H} &= (\sigma + j\omega\varepsilon)\boldsymbol{E} \\ &= j\omega\varepsilon\left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon}\right)\boldsymbol{E} = j\omega\varepsilon_{eff}\boldsymbol{E} \end{aligned} \quad \cdots\cdots (11)$$

式(11)で，

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon\left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon}\right) \quad \cdots\cdots (12)$$

とすれば，式(12)は導電性を含んで誘電率を扱えるようになるので，これを実効誘電率(effective permittivity)として用いる場合があります(4)．

また，マイクロ波回路で実効誘電率といえば，マイクロストリップ線路などでも使われています．**図4**はMicro-Stripes注4のシミュレーション結果で，線路の進行方向に垂直な断面における電力分布を表しています．このように電磁エネルギーの多くは誘電体中を伝わりますが，空間を伝わる量の割合によって決まる，誘電体の実効的な効果を考慮した誘電率という意味で，やはり実効誘電率という用語が定義されています．

図5はSonnet Lite注5でマイクロストリップ線路をシミュレーションしたときに表示される画面です．ここでは

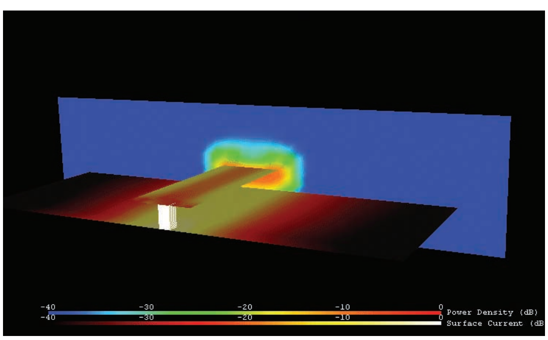
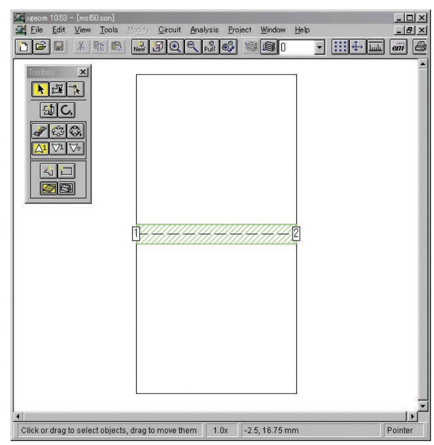
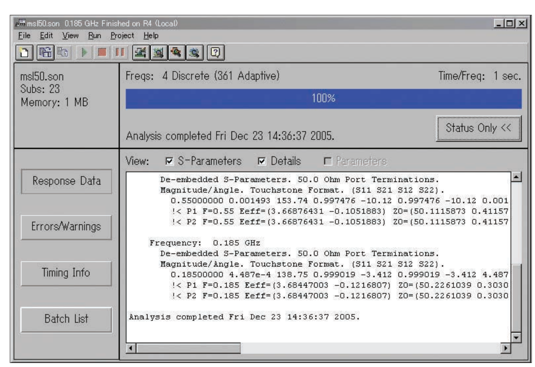


図4　マイクロストリップ線路の進行方向に垂直な断面における電力分布(Micro-Stripes)
電磁エネルギーの多くは誘電体中を伝わる．



(a) モデル



(b) シミュレーション結果

図5　Sonnet Liteの画面
Eeffの次に表示されている数値が実効比誘電率．

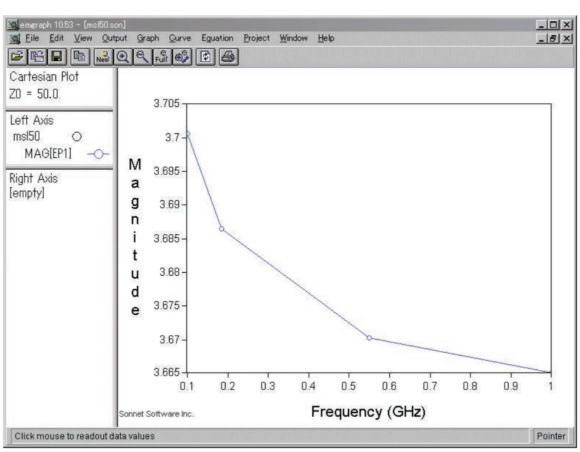


図6　Sonnet Liteによって得られた実効比誘電率のグラフ
グラフ表示の左枠内にあるDB[S11]を右ボタンでクリックして，「Edit Curve Group...」で表示されるダイアログ・ボックスのData Typeプルダウンを「Port Eeff」に設定する．

注4：Flomerics Micro-Stripes(マイクロストライプス)のWebサイトは，http://www.flomerics.com/microstripes/
注5：無償版のSonnet Liteは，本誌2006年4月号のCD-ROMに収録されている．Sonnet技研のWebサイトからもダウンロードできる．http://www.sonnetsoftware.co.jp/

誘電体の比誘電率を4.9に設定しており，Eeffの次に表示されている3.68…が実効比誘電率の値です．グラフ表示の左枠内にあるDB[S11]を右ボタンでクリックして，「Edit Curve Group...」で表示されるダイアログ・ボックスのData Typeプルダウンを「Port Eeff」に設定すると，**図6**のような実効比誘電率のグラフが表示されます．

図7は**図4**の電界ベクトル表示です．電界は誘電体中と空気中に広く分布していることがわかります．**図8**は面積S，狭い間隔dの平行平板で，面積qSの部分にだけ比誘電率ε_rの誘電体があります．このコンデンサの容量Cは次の式で求められます．

$$C=\frac{\varepsilon_0 qS\varepsilon_r}{d}+\frac{\varepsilon_0 qS(1-q)}{d}=\frac{\varepsilon_0 S}{d}\{1+q(\varepsilon_r-1)\}$$

$$=\frac{\varepsilon_0 S\varepsilon_{eff}}{d} \quad \cdots\cdots(13)$$

ここでqは充てん率

$$\varepsilon_{eff}=1+q(\varepsilon_r-1) \quad \cdots\cdots(14)$$

とすれば，式(14)は実効的な誘電率を表しています．

また，**図7**のようなマイクロストリップ線路をある長さで切り出して考えると，線路とグラウンドの間の容量をCとし，線路の誘電体の比誘電率ε_rを1としたときの容量をC_0とすれば，次の式で実効誘電率を定義できます[(5)]．

$$\varepsilon_{eff}=\frac{C}{C_0} \quad \cdots\cdots(15)$$

2．小型化できる誘電体アンテナ

「八木・宇田アンテナ」は，八木秀次，宇田新太郎の両博士[注6]が発明した有名なアンテナで，テレビ放送の受信用として世界中で広く使われています．大正末期に発明され，英文の論文が発表されたのは1928年です．翌年に仙台で20kmの通信に成功したUHF帯の八木・宇田アンテナが，東北大学 電気通信研究所に展示されています．

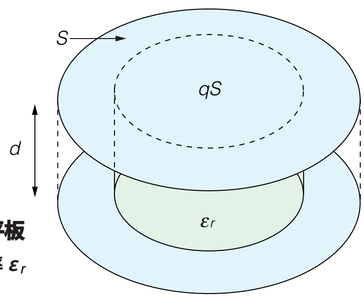


図8
面積*S*，狭い間隔*d*の平行平板
面積qSの部分にだけ比誘電率ε_rの誘電体がある．

注6：大正15年(1926年)，八木秀次博士(1886年～1976年)は当時東北帝国大学の八木研究室の講師・宇田新太郎(1896年～1976年)と連名で帝国学士院に論文を発表．その後特許を取り，昭和3年(1928年)に英文の論文を発表したことで，日本よりも海外で有名になった．

● 八木アンテナと誘電体

戦時中はレーダにも使われましたが，その中には潜水艦用に開発された八木・宇田アンテナがありました．**図9**のようにアンテナの周りを誘電体で対称形に囲んで防水していますが，これは初期の誘電体アンテナといえるでしょう．

このように自由空間で使うように設計されたアンテナの一部または全部を誘電体で囲んだアンテナは，「誘電体アンテナ」または「誘電体装荷アンテナ」と呼ばれています．ユビキタス装置に内蔵するアンテナは，プリント回路基板にエレメントのパターンを形成することが多く，もともと誘電体上に作られます．しかし，一般に誘電体アンテナといえば，セラミックスなどの高誘電率材料を用いることで，その波長短縮効果を活用して小型化設計したものを指します．

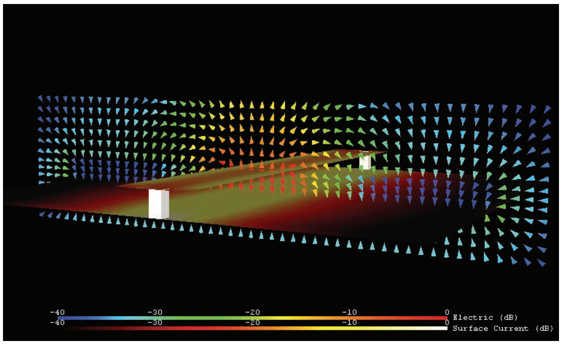


図7　図4の電界ベクトル表示(Micro-Stripes)
電界は誘電体中と空気中に広く分布している．

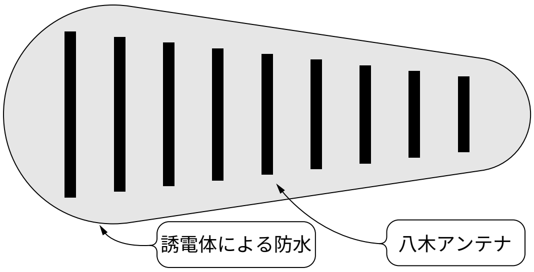


図9　周りを誘電体で防水した八木・宇田アンテナ
潜水艦用に開発された八木・宇田アンテナである．アンテナの周りを誘電体で対称形に囲んで防水している．

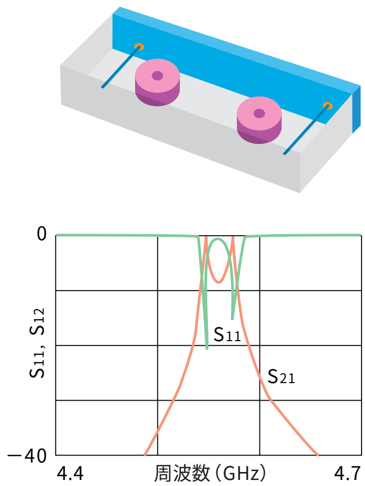


図10　誘電体共振器を2本並べたバンドパス・フィルタの例(MW Studio)

円筒誘電体の共振周波数付近で，入力ポートから出力ポートへ電磁エネルギーが伝わることで，通過帯域を作り出している．

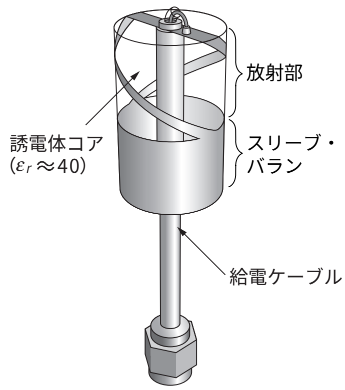


図11　エレメントを2本にしたツイストループ・アンテナ

最下部のコネクタから給電ケーブルが延びて，誘電体コアを貫通して最上部に達している．同軸ケーブルの内導体と外導体は，それぞれのエレメントに接続されており，それらは円筒形の外周によじれた形で巻き付き，最終端はスリーブ・バラン部に接続されている．

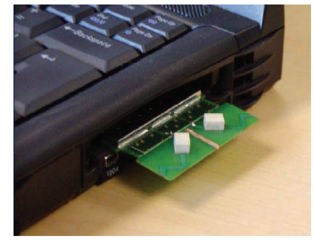


写真1　無線LAN用のPCMCIAカード

英国Antenova社が開発したもの．



写真2　ツイストループ・アンテナ

英国Sarantel社が開発したもの．

● 誘電体共振器アンテナ

誘電率の高い材料で作った円筒形のポストは，誘電体共振器として動作します．**図10**はこれを2本並べたバンドパス・フィルタの例[注7]で，円筒誘電体の共振周波数付近で，入力ポートから出力ポートへ電磁エネルギーが伝わることで通過帯域を作り出しています．

共振器の周りには強い電磁エネルギーの分布がありますが，これを積極的に空間へ放射できれば，効率のよいアンテナになります．

写真1は英国Antenova社が開発した無線LAN用のPCMCIAカード[注8]です．ケースが取り除かれているので基板のようすがよくわかります．角砂糖のようなキューブが誘電体アンテナで，直下のマイクロストリップ線路を伝わる電磁エネルギーを誘電体共振器に移すことで給電していると考えられます．

二つのアンテナはハの字形に置かれており，線路に平行な方向にできる強い電界は互いに直交しています．放射電界の向きを偏波といいますが，これは二つのアンテナの受信電力を比較して，大きいほうに切り替えて通信する，偏波ダイバーシティ(6)の機構を備えたアンテナです．

これは前項で述べたような，既存のアンテナに誘電体を装荷した「誘電体装荷アンテナ」と明確に区別するために，「誘電体共振器アンテナ」と呼ばれることがあります．

● 小型ツイストループ・アンテナ

写真2は英国Sarantel社が開発したツイストループ・アンテナ[注9]です．左側はケースを取り除いた状態で，セラミック製の円筒形の外周に沿ってエレメントが巻き付いた構造をしています．

図11はエレメントを2本にして，アンテナの内部をわかりやすく示しています．最下部のコネクタから給電ケーブルが延びて，誘電体コアを貫通して最上部に達しています．同軸ケーブルの内導体と外導体は，それぞれのエレメントに接続されており，それらは円筒形の外周によじれて巻き付き，最終端は**図11**に示すスリーブ・バラン部に接続されています．

図12は中心を通る断面で表した構造図と，給電部の回路です．Z_{source}は不平衡給電のインピーダンスを表しています．不平衡線路である同軸ケーブルは，上部で平衡負荷である一対のツイストループ部へ直接接続されています．

注7：CST Microwave StudioのWebサイト(http://www.cst.de/Content/Articles/article30.aspx)およびAETの日本語ページ(http://www.aetjapan.com/software/3dsim_mwstudio_range05.html)を参照．
注8：Antenova社のWebサイト(http://www.antenova.com/pdf/WIFI_DATANOVA_CARD.pdf)を参照．
注9：Sarantel社のWebサイトのURLはhttp://www.sarantel.com/．写真2のアンテナはMICROWAVE ENGINEERING誌のWebサイト(http://www.mwee.com/mwee_news/showArticle.jhtml?articleID＝17301304)を参照．

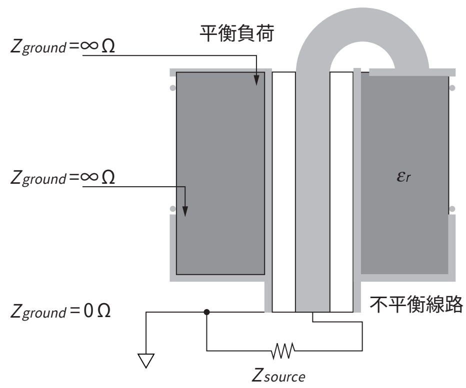


図12
中心を通る断面で表した構造図と給電部の回路
Z_{source} は不平衡給電のインピーダンス．

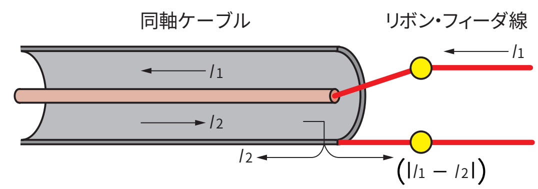


図13　同軸ケーブルに平衡線路を直接接続
同軸ケーブルの外導体の内面を流れてきた電流の一部（I_2）は外導体の外側に回り込む．

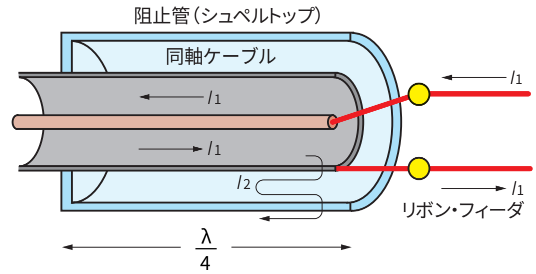


図14　阻止管（シュペルトップ）
接続点では，阻止管と電気的に絶縁したのと同じ状態になり，リボン・フィーダ線には平衡電流が流れるようになる．

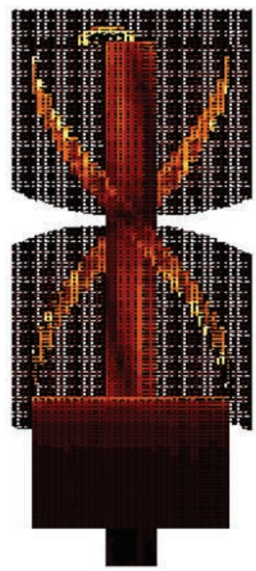


図15
エレメント表面の電流分布（Micro-Stripes）
スリーブ・バランの上部縁に沿った部分のみに強い電流が認められ，そのほかのバラン表面はほとんど電流が流れていない．

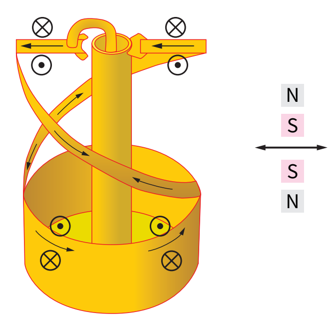


図16
電流の向きと磁界の向きの関係
⊙と⊗磁界の向き．⊙は矢の先端，つまり誌面の奥から手前へ，⊗は矢羽根を後ろから見たところ，つまり誌面の手前から奥へという向きを示している．

しかし，このままでは**図13**のように，外導体の外側に回り込むコモンモード電流が発生してしまいます（2005年11月号，pp.79-86の連載第14回を参照）．

そこで1/4波長の金属の筒をかぶせ，下端で同軸ケーブルの外導体につないで，**図14**に示す阻止管（シュペルトップ）構造を形成しています．エレメントの接合部から見込んだインピーダンスは無限大になる（連載第14回を参照）ので，両エレメントには平衡電流が流れるようになります．これをスリーブ・バランと呼んでいます．バラン（Balun）とは，balanced to unbalanced transformerの略で，平衡-不平衡変成器の意味です．

● 低SAR設計の手法

図15はMicro-Stripesのシミュレーション結果で，エレメント表面の電流分布を表しています．スリーブ・バランの上部縁に沿った部分にのみ強い電流が認められ，そのほかのバラン表面はほとんど電流が流れていません．周縁は**図12**に示すように，給電回路の実際のグラウンドから絶縁された，いわば仮想グラウンド（$Z_{ground}=\infty\Omega$）ですから，ツイストループ部の電流は理想的な平衡状態になっています．

また，この電流は上下の端部付近が強く中央が弱くなっていますから，それぞれ1/2波長の波が乗って共振していると考えられます．ある瞬間における電流の向きは**図16**に示すようになっていますから，磁界はアンペアの右ネジの法則から，⊙印に向かいます．エレメントの上半分に発生する磁界と下半分の磁界は，静磁界の磁石で考えれば，**図16**の右のようにN極とS極になり，中央部で抑制されて小さくなると想像できるでしょう．

このような特徴は，携帯電話などのような頭部に密着し

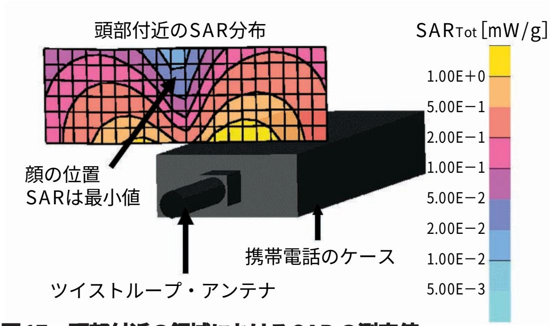


図17　頭部付近の領域におけるSARの測定値
顔の位置に相当する領域にSARの最小値がある．

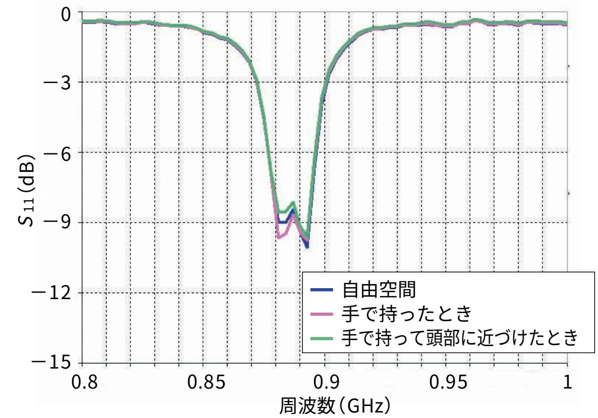


図18　S_{11}のグラフ
自由空間（青），手で持ったとき（ピンク），手で持って頭部に近づけたとき（緑）の測定値．

て使う装置に最適です．図17は頭部付近の領域におけるSARの測定値ですが，つごうのよいことに，SARの最小値が顔の位置にあります．これはいくつかの試作アンテナの中の一つの結果ですが，市販のアンテナと比較したところ，同じ位置で1.26（mW/kg）だったSARが0.07（mW/kg）まで減少したとの報告があります[(7)]．

このアンテナのもう一つのメリットは，図18のS_{11}のグラフによく現れています．三つのグラフはほとんど重なっていますが，これらは自由空間（青），手で持ったとき（ピンク），手で持って頭部に近づけたとき（緑）の測定値です．図17からもわかるように，頭部すなわち誘電体内に分布する電磁エネルギー量はわずかです．したがって波長短縮効果も小さく，周波数のシフトはほとんどありません．このため，いちど自由空間で最適化すれば，そのまま設計を確定することができ，めんどうな調整の手間が省けるでしょう[(7)]．

まとめ

ひと口に誘電体といっても，陶磁器のような絶縁体から，人体のように導電性があって電磁エネルギーが集中しやすいものまでさまざまです．エーテルという媒体の存在が否定された今，真空も真空媒質（真空誘電率ε_0）として定義されています．また，最近は負の誘電率・透磁率を示すメタマテリアル（metamaterials）[注10]も注目されており，新たな誘電体を活用したアプリケーションの開拓が期待されます．電磁環境の中で，誘電体としての人体が占める役割も急速に変わりつつありますから，低SARを目ざす設計も強く求められることでしょう．

注10：メタマテリアルとは，規則正しい構造配列の周期が電磁波などの波動の波長に関与して現れる特異な物理現象を人工的に作りだした媒質．自然界に存在しないという意味で人工媒質とも呼ばれる．文献(8)を参照．

参考・引用*文献

(1) L. バーネット，中村誠太郎訳；相対論はいかにして作られたか，ブルーバックスB-119，講談社，1972年（第10刷）．
(2) 木幡赳士；新説アインシュタイン，第2部 これだけ知れば相対性理論の中級者，学習研究社，2005年．
(3) 東京理科大学 理工学辞典編集委員会編；理工学辞典，日刊工業新聞社，1996年（初版）．
(4) 清水俊之，三原義男；マイクロ波工学，東海大学出版会，1975年（第9刷）．
(5) 小西良弘；マイクロ波回路の基礎とその応用，総合電子出版社，2000年（第5版）．
(6) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶワイヤレスの世界，CQ出版社，2003年（第2版）．
(7) Dr. Rachid Aitmehdi；UWB and Dielectric Antennas − State of the art in Antennas for Consumer Products −，マイクロウェーブ展 2003，出展企業セミナー資料，2003年（著者は英国RFTechnics社，http://www.rftechnics.com/の社長）．
(8) 小特集 ユビキタス電磁環境を支える新しい電波吸収体技術，電子情報通信学会誌，vol.88，no.12，2005．

こぐれ・ひろあき
小暮技術士事務所・技術士（情報工学部門）
http://www.kcejp.com/